



**Technische  
Universität  
Braunschweig**

**Projektarbeit**

# **Experiment am D-förmigen Stumpfkörper**

**Nora M. Bierwagen  
Tim Gotzel  
Amiriman Kianfar  
Kebria Kiani  
Florian Timm**

Ausgegeben: Institut für Strömungsmechanik  
Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. R. Radespiel  
Technische Universität Braunschweig

Betreuer: M.Sc. Philipp Oswald, (TU Braunschweig)

Veröffentlichung: 29. November 2018



# Zusammenfassung

evtl. eine Kurzzusammenfassung  
Ist das notwendig?



# Inhaltsverzeichnis

<b>Nomenklatur</b>	<b>v</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1 Stumpfkörperaerodynamik (TG) . . . . .	2
2.1.1 Geometrische Einordnung . . . . .	2
2.1.2 Strömungsbild . . . . .	2
2.1.3 Praktische Bedeutung der Stumpfkörper . . . . .	4
2.2 Coandă-Effekt (TG) . . . . .	4
2.3 Aktive Strömungsbeeinflussung (NB) . . . . .	4
<b>3 Versuchsvorbereitung (NB)</b>	<b>9</b>
3.1 Stumpfkörper . . . . .	9
3.2 Rotierende Walzen . . . . .	10
3.2.1 Zahnform . . . . .	10
3.2.2 Anzahl der Zähne . . . . .	12
3.2.3 Zahnöffnung . . . . .	13
<b>4 Widerstandsbestimmung</b>	<b>15</b>
4.1 mathematisches Modell . . . . .	15
4.2 Implementierung . . . . .	15
<b>5 Windkanalversuche</b>	<b>16</b>
5.1 Windkanal . . . . .	16
5.2 Versuchsaufbau . . . . .	16
5.3 Messeinrichtung . . . . .	16
5.4 Versuchsdurchführung . . . . .	16
<b>6 Versuchsauswertung</b>	<b>17</b>
6.1 Messdaten . . . . .	17
6.2 Vergleich mit Erwartungen . . . . .	17
6.3 Vergleich zum Modell ohne Walzen . . . . .	17
6.4 Effizienzbetrachtung . . . . .	17
<b>7 Fazit</b>	<b>18</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>19</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>20</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>21</b>
<b>A Technische Zeichnungen (NB, TG)</b>	<b>22</b>
<b>B Messreihe</b>	<b>26</b>



# Nomenklatur

## Lateinische Bezeichnungen

*Str*          Strouhal-Zahl

## Griechische Bezeichnungen

## Indizes

## Abkürzungen

<i>NB</i>	<u>N</u> ora M. <u>B</u> ierwagen
<i>TG</i>	<u>T</u> im <u>G</u> otzel
<i>AK</i>	<u>A</u> miriman <u>K</u> ianfar
<i>KK</i>	<u>K</u> ebria <u>K</u> iani
<i>FT</i>	<u>F</u> lorian <u>T</u> imm
<i>rpm</i>	Umdrehungen pro Minute

# Kapitel 1

## Einleitung

kurze Einleitung Stumpfkörper  
aufbauend auf Masterarbeit  
Ziel der Arbeit

Da es sich bei diesem Dokument um eine Projektarbeit handelt, an der insgesamt fünf Personen mitgewirkt haben, stehen hinter jeder Kapitel- bzw. Unterkapitelüberschrift die Initialen des Autors. In Tabelle 1.1 ist eine Aufschlüsselung der Initialen gegeben.

Name	Initialen
Nora M. Bierwagen	NB
Tim Gotzel	TG
Amiriman Kianfar	AK
Kebria Kiani	KK
Florian Timm	FT

**Tabelle 1.1:** Initialen der beteiligten Personen



# Kapitel 2

## Grundlagen

### 2.1 Stumpfkörperaerodynamik (TG)

Im folgenden Kapitel wird der Begriff der Stumpfkörper in Abgrenzung zu den schlanken Körpern eingeführt. Dabei soll im Besonderen auf das charakteristische Strömungsfeld eingegangen und die Charakteristiken des Nachlaufs spezifiziert werden.

#### 2.1.1 Geometrische Einordnung

Ein stumpfer Körper in einer Anströmung differenziert sich geometrisch von einem schlanken insofern, dass er eine signifikante Dicke quer zur Anströmung aufweist, welche in vergleichbarer Größenordnung wie die Abmessungen parallel zur Anströmung liegt. Als Maß kann das Dickenverhältnis  $\sigma$  als Kehrwert des Schlankheitsgrades  $\lambda$  herangezogen werden, welches das Verhältnis von Dicke zu Breite wiedergibt:

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} = \frac{d}{l} \quad (2.1)$$

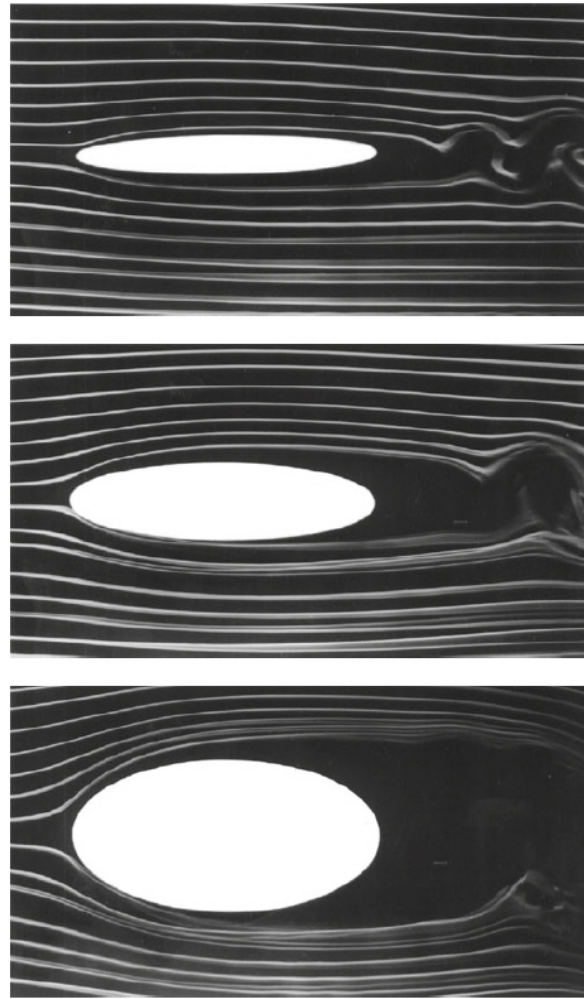
Wie in Abbildung 2.1 zu sehen ist, verändert sich das Strömungsbild maßgeblich mit dem Dickenverhältnis  $\sigma$ , wobei der Übergang von schlanken zu stumpfen Körpern fließend ist.

Neben dem Dickenverhältnis kann ein diskontinuierlicher Verlauf der Körpergeometrie, wie dies beispielsweise bei der ausgeprägten Hinterkanten eines Fahrzeughecks der Fall ist, als geometrische Charakterisierung eines stumpfen Körpers herangezogen werden.

#### 2.1.2 Strömungsbild

Bei der Umströmung des Körpers kommt es zur Ausbildung einer Grenzschicht. Ein Teil der kinetischen Energie der Grenzschichtströmung wird durch Reibung an der Wand dissipiert. Die Geometrie eines stumpfen Körpers, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, führt gemäß Bernoulli zu einer Absenkung des statischen Drucks bis zur dicksten Stelle. Hinter dieser steigt der statische Druck wieder an, wobei die durch Reibung verringerte kinetische Energie nicht mehr ausreicht, um gegen diesen anzuströmen. Ist die kinetische Energie vollends in Druck umgewandelt, kommt es zur Rückströmung, wobei die Grenzschicht ablöst [4].

Der gleichen Argumentation folgend ist der Ablösepunkt an einer gegebenenfalls vorhandenen



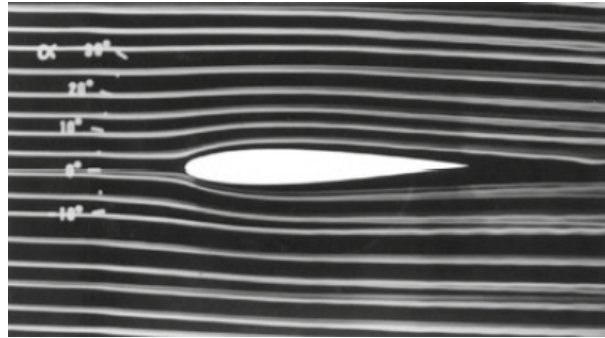
**Abbildung 2.1:** elliptische Zylinder unterschiedlicher Dickenverhältnisse im Rauchkanal [4]  
 oben  $\sigma = 0,13$   
 Mitte  $\sigma = 0,26$   
 unten  $\sigma = 0,5$

diskontinuierlichen Stelle der Körpergeometrie lokalisiert. In der Praxis ist dies häufig eine Hinterkante.

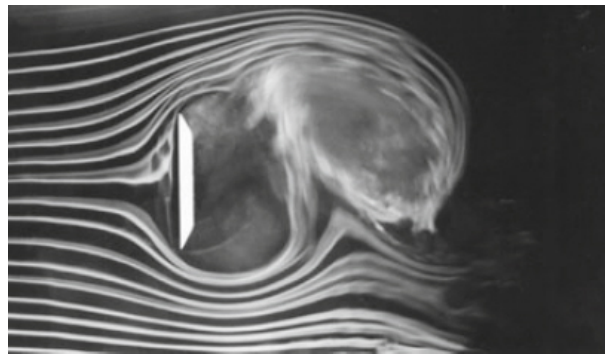
Das Ablösen hat die Ausbildung eines Totwassers zur Folge, in dessen Gebiet sich das Fluid bedingt durch Zähigkeitseffekte verwirbelt und Wirbelschichten ausbildet. Wie man in Abbildung 2.3 sehen kann, ist das Totwasser ein Charakteristikum des Strömungsbildes stumpfer Körper. Im Vergleich dazu ist dieses Gebiet beim Strömungsbild schlanker Körper, wie in Abbildung 2.2 zu sehen, nicht vorhanden, da hier ein nahezu störungsfreies Abströmen möglich ist.

Innerhalb des Totwassers existiert eine instationäre periodische Strömung, welche durch Druckschwankungen zu oszillierende Ablösungen führt. Diese Oszillation weist eine charakteristische Frequenz auf und wird durch die Stouhal-Zahl  $Sr$  beschrieben.

Die Wirbel innerhalb der turbulenten Strömung zerfallen kaskadenartig in kleinere Wirbel und dissipieren dabei ihre Energie in Wärme, bis sie sich gänzlich auflösen und sich erneut ein laminares Strömungsprofil ausbildet. Dennoch ergibt sich im Nachlauf des stumpfen Körpers eine Delle im Geschwindigkeitsfeld.



**Abbildung 2.2:** Stromlinienbild eines schlanken Körpers im Rauchkanal [4]



**Abbildung 2.3:** Stromlinienbild eines stumpfen Körpers im Rauchkanal [4]

### 2.1.3 Praktische Bedeutung der Stumpfkörper

tbd

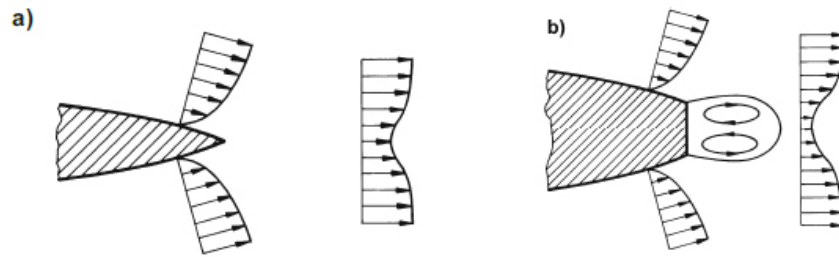
## 2.2 Coandâ-Effekt (TG)

Der Coandâ-Effekt tritt auf, wenn ein Strahl entlang einer Körperkontur strömt. Anders als die bisher betrachtete Strömung, kann die sogenannte Coandâ-Strömung des Strahles der Kontur einer konvexen Rundung folgen ohne abzulösen. Bei der normalen Anströmung führt die konvexe Rundung nach Bernoulli zu einer Verlangsamung der Strömung und demgemäß einer Druckerhöhung, was eine Rückströmung und Ablösung zur Folge hat. Dies wurde bereits in 2.1.2 diskutiert.

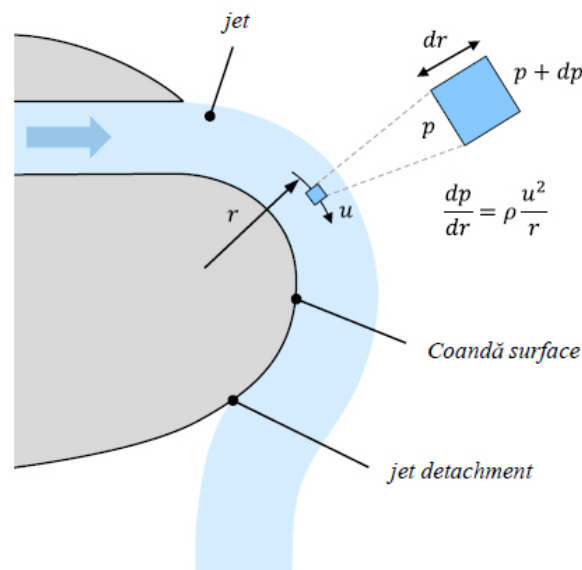
Da es sich bei der Coandâ-Strömung um einen Strahl handelt, gibt es zur Grenzschicht eine zusätzliche Reibungsschicht zum umgebenden Medium. Dies wird in Abbildung 2.5 gezeigt. Da das Umgebungsmedium ruht gibt es gemäß Bernoulli keinen Druckanstieg entlang der konvexen Rundung, die Grenzschicht bleibt stabil. Aus diesem Grund haftet die Coandâ-Strömung länger an Körperkontur an.

## 2.3 Aktive Strömungsbeeinflussung (NB)

Stumpfe Körper haben meist ein abruptes Ende, an dem sich strömungsmechanische Nachteile ergeben. Deshalb soll durch eine Anpassung der Geometrie des Körpers oder durch die strukturelle Veränderung des Totwassers dieser ausgeglichen werden. Ziel ist es, den Basisdruck anzuheben und darüber den Druckwiderstand des Körpers zu verringern [4].



**Abbildung 2.4:** Nachlauf eines a) schlanken Körpers und eines b) stumpfen Körpers [4]



**Abbildung 2.5:** Skizze zum Coandă-Effekt [7]

Die nachfolgende Arbeit konzentriert sich auf ein aktives Verfahren der Strömungsbeeinflussung, weshalb im folgenden einige bis jetzt realisierte Verfahren vorgestellt werden.

Bearman [4] hat als einer der ersten die aktive Strömungsbeeinflussung nachgewiesen. Abbildung 2.6 zeigt das verwendete Stumpfkörpermodell. Dabei ist als Besonderheit auf die poröse Basis hinzuweisen, durch die zusätzlich Luft am Ende des Körpers ausgestoßen wird.

Die austretende Luft sorgt dafür, dass die Strömungsablösung vom Körperende weggeschoben wird. Durch die erst weiter hinten stattfindende Verwirbelung, fällt der Widerstand des Körpers ab.

Geropp und Odenthal beschreiben in [2] Experimente zur Einblasung am Ende eines Kraftfahrzeuges über zwei Schlitze mit Nutzung des Coandă-Effekts (Abbildung 2.7).

Hierbei ist für die Beeinflussung der Grenzschicht die Ausblasung bei hohen Geschwindigkeiten erforderlich. Durch den Coandă-Effekt wird die eingeblasene Luft in das Todwasser umgelenkt, wo sie wieder abgesaugt wird. Dadurch wird der Druck hinter dem Fahrzeug erhöht und der Gesamtwiderstand verringert. Die Experimente zeigen, dass eine Druckerhöhung von 50% und eine Widerstandsverringerng um 10% möglich ist. Außerdem wird ein Energievorteil für moderate Ausblasgeschwindigkeiten mathematisch festgestellt.

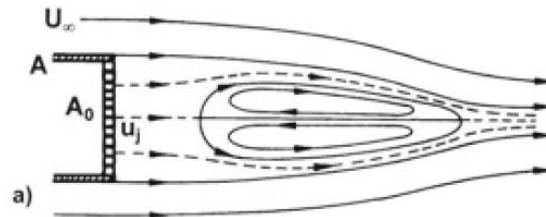


Abbildung 2.6: Stumpfkörper mit Ausblasung von Bearman [4]

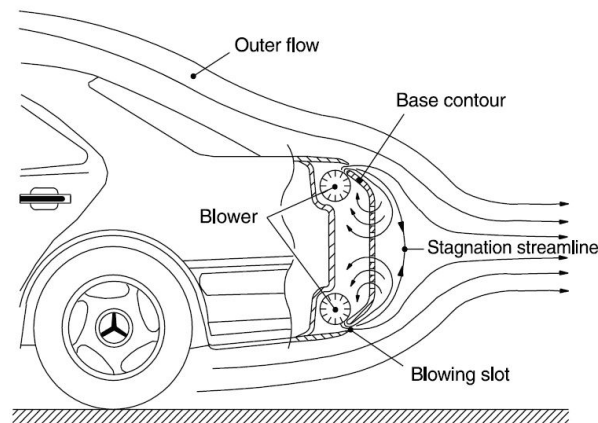


Abbildung 2.7: Stumpfkörper mit Ausblasung von Geropp [2]

In [1] wird zusätzlich zu den vorher beschriebenen Verfahren die Ausblasung gepulst durchgeführt. Dabei soll der Einfluss von Frequenz und Amplitude auf das Widerstandsverhalten untersucht werden.

In Abbildung 2.8 ist der schematische Aufbau der gepulsten Ausblasung dargestellt. Diese wird über Ventile realisiert, die eine Rechteckkurve mit einem duty cycle (weitere Erläuterungen in Kapitel 3.2) von 40% erzeugen. Direkt unter der Ausblasstelle wird zusätzlich noch eine Coanda-Fläche befestigt.

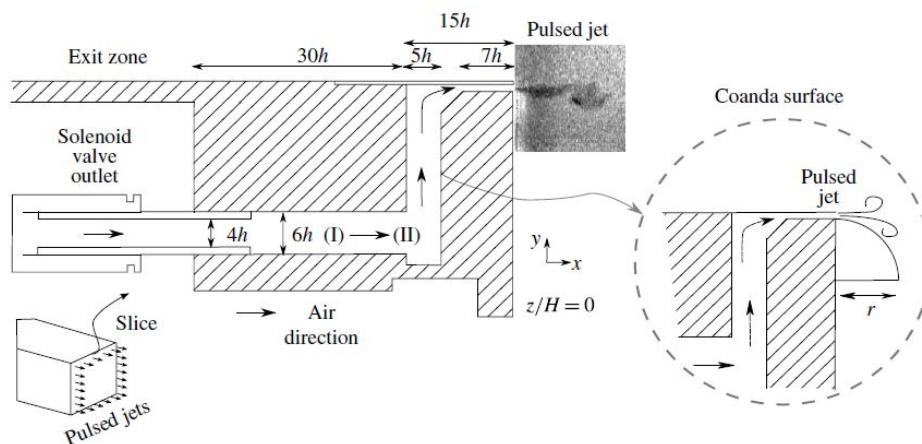
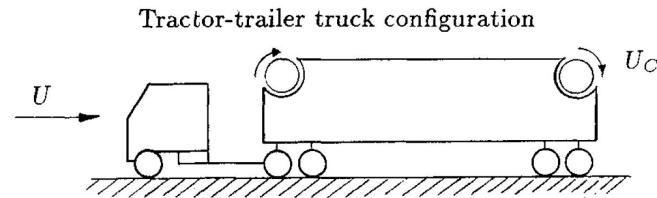


Abbildung 2.8: Ausblasung von [1]

Mit eher steigender Frequenz und steigender Amplitude, wurde eine Umlenkung der Grenzschicht beobachtet. Über eine gepulste Einblasung, nahe der natürlichen Ablösefrequenz der Strömung,

kann nach [1] der Widerstand am meisten (10%) gesenkt werden. Bei zusätzlicher Nutzung der Coandă-Fläche kann eine Reduktion von 20% erreicht werden.

Modi et al. [6] versucht durch drehende Zylinder an einem Truck den Widerstand zu reduzieren.



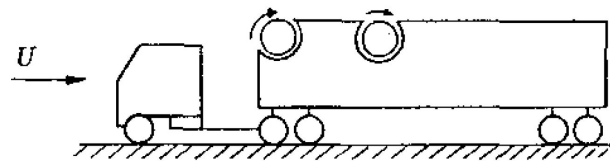
**Abbildung 2.9:** Erstes Truckmodell von Modi [6]

Dazu sind bei den ersten Windkanalversuchen die Zylinder angeordnet, wie in Abbildung 2.9 dargestellt. Bei dem ersten Versuch werden die Rauigkeiten der Zylinder variiert. Es gibt einen glatten Zylinder, einen mit einer Rauigkeit von 40 und einen mit 80. Außerdem wird das Verhältnis der Drehgeschwindigkeiten der Zylinder  $U_c$  bzgl. der Anströmgeschwindigkeit  $U$  für alle drei Fälle variiert. Daraus ergeben sich die Widerstandsreduktionen in Tabelle 2.1.

Zylinder	Widerstandsreduktion [%]	$U_c/U$
glatt	5	2
Rauigkeit 80	10	2.1
Rauigkeit 40	13	2.1

**Tabelle 2.1:** Widerstandsreduktion bei Modi

Da der hintere Zylinder keinen Impuls in die Grenzschicht einbringen kann, wurde ein zweites Experiment mit anderer Konfiguration durchgeführt. Dabei wurde ein Zylinder mit spiralförmiger Rille in der Oberfläche und einer mit einer Vielkeil-Verzahnung, deren Rillen parallel zur Drehachse verlaufen, verwendet. Die Position des ersten Zylinders bleibt unverändert, der Zweite wird ans Ende des ersten Drittels der Truckoberseite positioniert (siehe Abbildung 2.10).



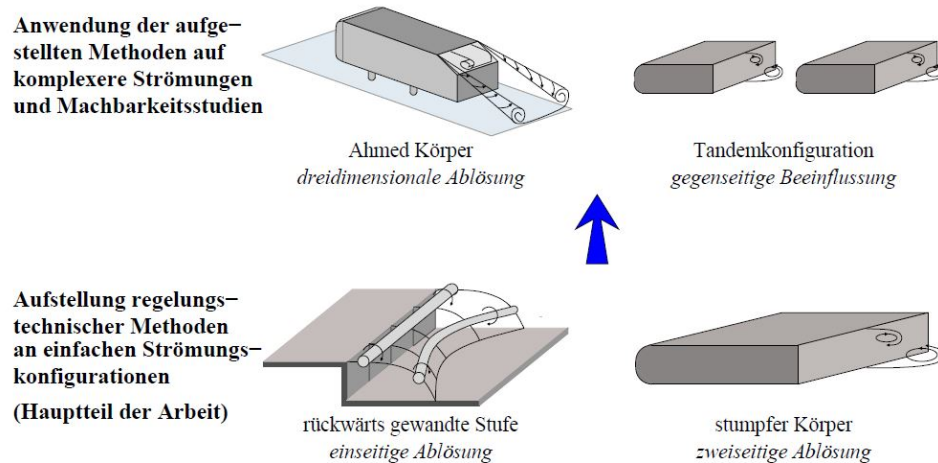
**Abbildung 2.10:** Zweites Truckmodell von Modi [6]

Der spiralförmige Zylinder erzielte das gleiche Ergebnis, wie der Zylinder mit einer Rauigkeit von 40 im ersten Experiment. Der Vielkeil-Verzahnungszylinder hat allerdings einen großen Einfluss auf den Widerstand. Bei alleiniger Betrachtung des vorderen Zylinders wird eine Reduktion von 29% erreicht, beide Zylinder erreichen bis zu 41%.

Alle bisher vorgestellten Verfahren haben nur eine Steuerung des Vorgangs betrachtet. In [3] wird jetzt zusätzlich eine Regelung des Mechanismus der Strömungsbeeinflussung eingeführt. Dabei möchte man äußere Störungen mit berücksichtigen, die zum Beispiel sich gegenseitig beeinflussende Kraftfahrzeuge aufeinander haben.

Im Rahmen der Arbeit [3] wurden unterschiedliche Körper (Abbildung 2.11) analysiert.

An der rückwärts gewandten Stufe wurde erfolgreich die Wideranlegelänge über einen segmentierten Schlitz an der Stufenkante geregelt. Außerdem konnte eine Unterdrückung von Störungen



**Abbildung 2.11:** betrachtete Modelle für Auslegung der Regelung [3]

erreicht werden. Das Ganze wurde über eine Robuste Regelung realisiert.

Am stumpfen Körper wurde mit Hilfe einer Phasenregelung an Ober- und Unterseite eine Widerstandsreduzierung von bis zu 15% erreicht.

Die Tandemkonfiguration wurde im Rahmen einer Machbarkeitsstudie [3] untersucht und für zukünftige Arbeiten als sinnvoll betrachtet. Dabei geht es um die Störeinflüsse, die der erste Körper auf den zweiten hat und wie dieser die Störung über eine Regelung beseitigen kann, sodass auch beim zweiten Körper eine Widerstandsreduzierung möglich ist.

Die Regelung stellt einen weiteren Schritt in Bezug auf eine Widerstandsreduktion von Stumpfkörpern dar. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Regelung nicht mit betrachtet, da erst das neue Konzept untersucht werden muss. Dieses kann dann evtl. in Zukunft um eine Regelung erweitert werden.

# Kapitel 3

## Versuchsvorbereitung (NB)

Bevor der Versuch im Windkanal stattfinden kann, muss das Experiment vorbereitet werden. Dazu wird in diesem Kapitel der verwendete Stumpfkörper, sowie die Konstruktion der rotierenden Walzen genauer vorgestellt.

### 3.1 Stumpfkörper

Der D-förmige Stumpfkörper war im Rahmen dieser Arbeit vorgegeben, da er schon Bestand und weiter verwendet werden soll.

Abbildung 3.1 zeigt eine schematische Zeichnung des Querschnitts des hier verwendeten Körpers. Die Modellhöhe  $h$  beträgt 53.4 mm, die Breite 390 mm und die Länge  $l$  von 190.6 mm.

Ein weiterer gegebener Modell-Parameter ist eine Stouhal-Zahl von 0,23 (nähere Erläuterungen in Kapitel 3.2).

Am rechten Ende des Körpers befinden sich zwei schematische Kreise, welche die rotierenden Walzen darstellen. Die Pfeile in den Kreisen geben die Drehrichtung an. Über die drehenden Walzen wird die Luft am Ende des Körpers in die Strömung eingeblasen. Eine genauere Beschreibung des Walzenaufbaus ist im folgenden Kapitel (Kapitel 3.2) gegeben.

Die rotierenden Walzen sind jeweils auf einer Welle gelagert und werden von Elektromotoren angetrieben. Die Elektromotoren haben eine maximale Drehrate von 3650 Umdrehungen pro Minute und eine minimale Drehrate von um die 100 Umdrehungen pro Minute.

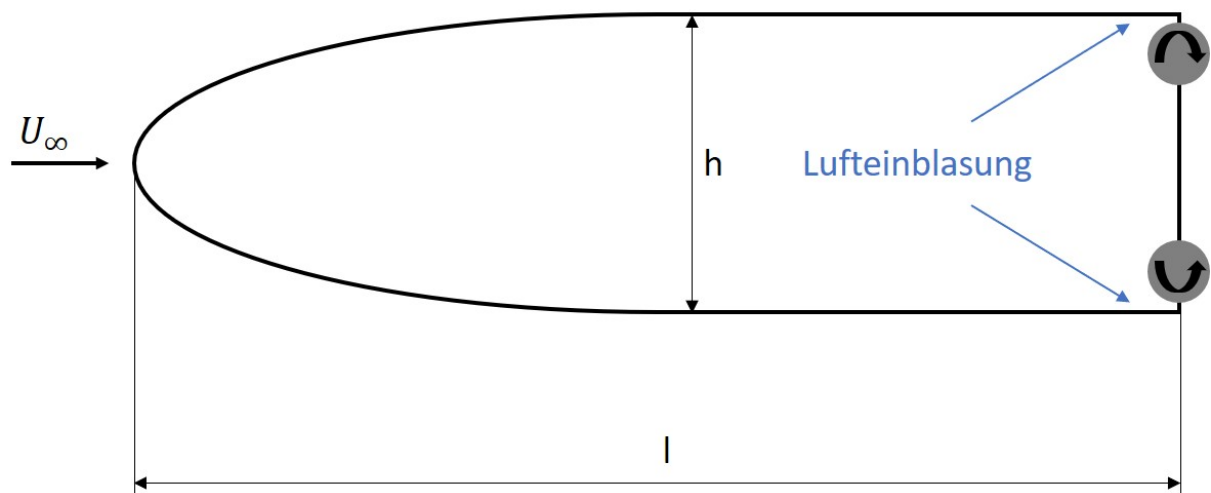


Abbildung 3.1: schematische Darstellung des Versuchsmodells



## 3.2 Rotierende Walzen

Die rotierenden Walzen erfüllen die Aufgabe, der gepulsten Einblasung in die Strömung am Ende des Stumpfkörpers.

Die Walzen bestehen aus einer Aluminium Innenwelle und einem mit Presspassung verbundenen Teflonrohr. In dem Teflonrohr ist die entscheidende Zahngeometrie eingebracht. Für Konstruktion des Teflonrohrs mussten folgende Aspekte betrachtet werden:

1. Zahnform
2. Anzahl der Zähne
3. Zahnöffnung

### 3.2.1 Zahnform

Die Zahnform hat Auswirkungen auf das gepulste Signal, das in die Strömung eingeführt wird. Als Grundlagen für die Signalform wurden folgende mathematische Funktionen (Abbildung 3.2) betrachtet.

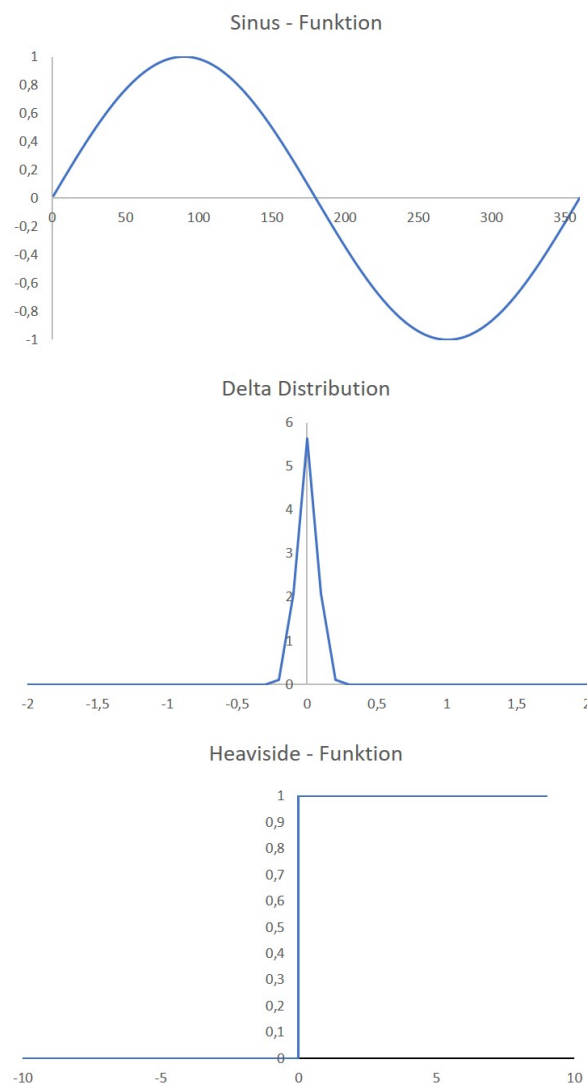


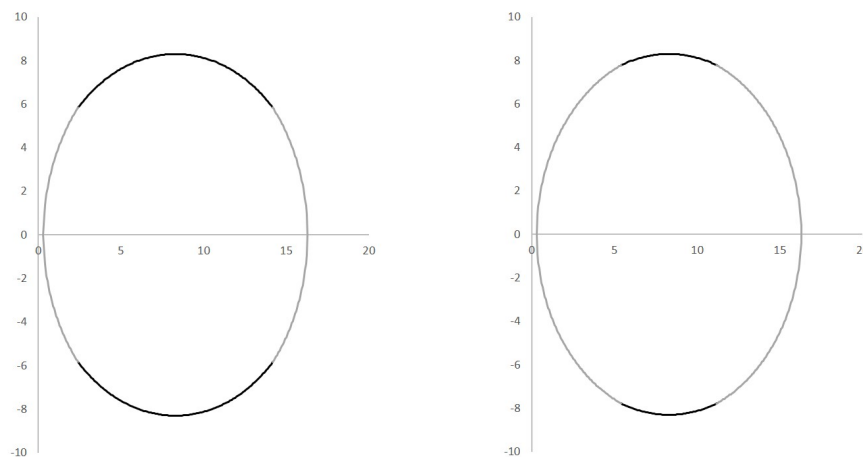
Abbildung 3.2: mathematische Funktionen für Zahnform

Für die Sinus Funktion eignet sich eher eine andere Form der Strömungsanregung, als die der drehenden Walzen. Diese kann besser über einen Null-Netto-Massenstrom-Jet-Aktuator [8] oder einen Lautsprecher dargestellt werden. Beide funktionieren über eine schwingende Membran, welche die Strömung anregt.

Ein Dirac-Impuls ist eine kurze Anregung der Strömung. Die Zeit in der die Luft in die Strömung eingeblasen wird, ist kurz im Vergleich zu der Zeit in der keine Anregung stattfindet. Damit könnte es zu einer nicht ausreichend großen Anregung kommen, die den gewünschten Effekt nicht induziert.

Eine Heaviside-Funktion stellt ein eindeutiges Signal dar, das entweder vollständig geschlossen oder geöffnet ist. Somit ist eine klare Definition des Zustands möglich.

Bei der endgültigen Wahl eines Signals ist der fertigungstechnische Aspekt ein weiterer wichtiger Parameter, der in diesem Fall die Wahl des Signals entschieden hat. Als finales Wellendesign wurden die zwei Wellen aus Abbildung 3.3 gefertigt. Diese wurden gewählt, da eine Fräsbearbeitung des Teflonrohrs zu Strömungsmechanisch ungünstigen Effekten geführt hätte. Der Fräser hat immer eine endliche Breite, sodass die Strömung durch die eventuell auftretenden minimalen Kanten zwischen den einzelnen Fräsbahnen gestört werden könnte. Somit wurde sich für eine Fertigung auf der Drehmaschine entschieden. Dabei wurden die Zahntäler über eine exzentrische Einspannung erreicht. Die Wahl für zwei Wellen wird im Folgenden näher betrachtet.



**Abbildung 3.3:** Querschnitt durch die finalen Walzen

Die Walzen Formen lassen sich über mehrere Kreisfunktion auf unterschiedlichen Intervallen darstellen (verschiedene Farben in Abbildung 3.3). Das linke Walze kann beschrieben werden über Gleichung 3.1.

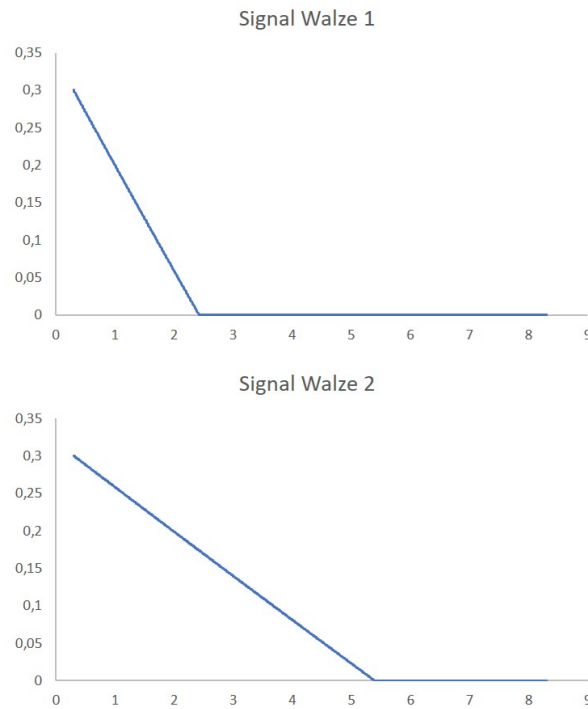
$$\begin{aligned} f_1(x) &= \pm \sqrt{9,15^2 - (x - 9,45)^2} & x \in [0, 3; 2, 42] \\ g_1(x) &= \pm \sqrt{8,3^2 - (x - 8,3)^2} & x \in [2, 42; 14, 18] \\ h_1(x) &= \pm \sqrt{9,15^2 - (x - 7,15)^2} & x \in [14, 18; 16] \end{aligned} \quad (3.1)$$

Die rechte Walze kann beschrieben werden über Gleichung 3.2.

$$\begin{aligned} f_2(x) &= \pm \sqrt{8,48^2 - (x - 8,78)^2} & x \in [0, 3; 5, 39] \\ g_2(x) &= \pm \sqrt{8,3^2 - (x - 8,3)^2} & x \in [5, 39; 10, 61] \\ h_2(x) &= \pm \sqrt{8,48^2 - (x - 7,82)^2} & x \in [10, 61; 16] \end{aligned} \quad (3.2)$$

Aus der Form der Walzen, die die Zahnform darstellen, lässt sich rückwirkend auf die Signalform

schließen. Das Signal ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Ein Wert von 0.3 mm entspricht dabei einem offenen Signal, d.h. es wird Luft in den Spalt eingeblasen. Bei einem Wert von 0 mm findet keine Einblasung statt. In den Graphiken ist ein Signalverlauf für eine Viertelumdrehung der Walze dargestellt. Aufgrund von Symmetrie folgt im weiteren ein spiegelverkehrter Verlauf und danach eine periodische Fortsetzung, wie in Abbildung 3.5 dargestellt.

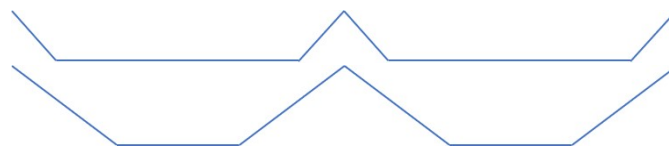


**Abbildung 3.4:** Signalverlauf der Walzen

Der lineare Verlauf der ersten Walze lässt sich annähern über Gleichung 3.3 und der der zweiten Walze über Gleichung 3.4.

$$l_1(x) = -0.14x + 0.3388 \quad (3.3)$$

$$l_2(x) = -0.059x + 0.31801 \quad (3.4)$$



**Abbildung 3.5:** Periodische Signale der Walzen

### 3.2.2 Anzahl der Zähne

Als zweites wird im folgenden auf die Entscheidung der Anzahl der Zähne detaillierter eingegangen. Ein ausschlaggebender Punkt ist dabei, dass die Einblasung mit einer Frequenz in Umgebung

der Ablösefrequenz der Strömung durchgeführt wird. Außerdem soll die Drehzahl der Elektromotoren nicht überschritten werden.

Die Ablösefrequenz der Strömung kann über die dimensionslose Strouhal-Zahl berechnet werden. Die Strouhal-Zahl ist nach [5] definiert als

$$Str = \frac{f * D}{U_{\infty}} \quad (3.5)$$

Hierbei ist  $f$  die Ablösefrequenz der Strömung,  $D$  die Profildicke im breitesten Querschnitt und  $U_{\infty}$  die Anströmgeschwindigkeit des Windkanals.

Wenn man Gleichung 3.5 nach der gewünschten Variable umstellt (siehe Gleichung 3.6) und die gegebenen Werte aus Tabelle 3.1 einsetzt, erhält man

$$f = \frac{Str * U_{\infty}}{D} = \frac{0,23 * 16 \text{ m s}^{-1}}{0.0534 \text{ m}} = 68.91 \text{ Hz} \quad (3.6)$$

Parameter	Wert
Strouhal-Zahl	0,23
Anströmgeschwindigkeit	16 m s <sup>-1</sup>
Profildicke	53.4 mm

**Tabelle 3.1:** Modellwerte für Frequenzberechnung

Aus der Frequenz, die mindestens erreicht werden soll, kann nun berechnet werden, wie schnell sich die Walze mit welcher Zähnezahl drehen muss. Das Ergebnis für unterschiedliche Zähne findet sich in Tabelle 3.2.

Anzahl der Zähne	Drehgeschwindigkeit der Welle [Hz]	Drehgeschwindigkeit der Welle [rpm]
1	68,91	4134,6
2	34,46	2067,3
4	17,23	1033,65
6	11,49	689,1
8	8,61	516,83
10	6,89	413,46

**Tabelle 3.2:** Zähnezahlen mit zugehörigen Frequenzen

Aufgrund von Symmetrie und um dem möglichen Entstehen einer Unwucht entgegen zu wirken, wurde sich für eine gerade Zähnezahl entschieden. Durch die benötigte ausreichend große Lücke zwischen den Zähnen um einen effektiven Luftausstoß zu gewährleisten, wurde sich für eine Zähnezahl von zwei pro Walze entschieden.

### 3.2.3 Zahnöffnung

Als dritten Aspekt der Zahngestaltung wird im folgendem die Zahnöffnung betrachtet. Es wurden zwei Walzen mit zwei unterschiedlichen duty cycles gefertigt. Der duty cycle gibt den prozentualen Anteil der Zahnöffnung auf die gesamt mögliche Zahnöffnung (keine Zähne) an. Die Berechnungen des duty cycles für die erste Walze ist über Integration von Gleichung 3.1 und für

die zweite Walze von Gleichung 3.2 an einer Viertelwalze erfolgt. Für die Berechnungen wird das MATLAB Skript aus Abbildung 3.6 verwendet. Somit ergibt sich für die erste Walze ein duty cycle von 33% und für die zweite von 50%.

```
%Berechnung der Zahnöffnung
%Exzentrizität 1
f=@(x) sqrt((9.15.*9.15)-((x-9.45).*(x-9.45)));
q=integral(f, 0.3, 2.42);

%Exzentrizität 2
%f=@(x) sqrt((8.48.*8.48)-((x-8.48-0.3).*(x-8.48-0.3)));
%q=integral(f, 0.3, 5.39);

%Teil 2
g=@(x) sqrt((8.3.*8.3)-((x-8.3).*(x-8.3)));
r=integral(g, 2.42, 8.3); %Schnittpkt anpassen

%Außenkreis 16,6mm
h=@(x) sqrt((8.3.*8.3)-((x-8.3).*(x-8.3)));
s=integral(g, 0, 8.3);

%Innenkreis 16mm
t = pi.* 8.*8 / 4;

%freie Fläche
zahnf=q+r-t;
spaltf=s-t-zahnf;

prozent = spaltf / (s-t);

%Ausgabe
disp(['Zahnöffnung ' num2str(prozent)]);
```

**Abbildung 3.6:** MATLAB Skript zur Berechnung der Zahnöffnung

## Kapitel 4

# Widerstandsbestimmung

Text.

### 4.1 mathematisches Modell

### 4.2 Implementierung

## Kapitel 5

# Windkanalversuche

### 5.1 Windkanal

### 5.2 Versuchsaufbau

### 5.3 Messeinrichtung

### 5.4 Versuchsdurchführung

## Kapitel 6

# Versuchsauswertung

### 6.1 Messdaten

### 6.2 Vergleich mit Erwartungen

### 6.3 Vergleich zum Modell ohne Walzen

### 6.4 Effizienzbetrachtung



## Kapitel 7

## Fazit

# Literaturverzeichnis

- [1] D. Barros, Jacques Borée, Bernd R. Noack, Andreas Spohn, and Tony Ruiz. Bluff body drag manipulation using pulsed jets and coanda effect. *Journal of Fluid Mechanics*, 805:422–459, 2016.
- [2] D. Geropp and H.-J. Odenthal. Drag reduction of motor vehicles by active flow control using the coanda effect. *Experiments in Fluids*, 28(1):74–85, 2000.
- [3] L. Henning. *Regelung abgelöster Scherschichten durch aktive Beeinflussung*. PhD thesis, Technische Universität Berlin, Berlin, 2008.
- [4] W.-H. Hucho. *Aerodynamik der stumpfen Körper: Physikalische Grundlagen und Anwendungen in der Praxis*. Strömungsmechanik. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2., vollst. überarb. und erw. aufl. edition, 2011.
- [5] A. Leder. *Abgelöste Strömungen Physikalische Grundlagen*. Grundlagen und Fortschritte der Ingenieurwissenschaften / Fundamentals and Advances in the Engineering Sciences. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1992.
- [6] V. J. MODI, M. S. U. K. FERNANDO, and T. YOKOMIZO. Moving surface boundary-layer control - studies with bluff bodies and application. *AIAA Journal*, 29(9):1400–1406, 1991.
- [7] K. Stadlberger. *Modelling and Performance Aspects of Coandă Flap Systems*. PhD thesis, Technische Universität München, München, 2016.
- [8] Y. Utturkar, R. Holman, R. Mittal, B. Carroll, M. Sheplak, and L. Cattafesta, editors. *A Jet Formation Criterion for Synthetic Jet Actuators*, volume nos. 2003-0001 to 2003-1143 (with omissions in numbering) of *AIAA papers*, Reston, VA, 2003. American Institute of Aeronautics and Astronautics.

# Abbildungsverzeichnis

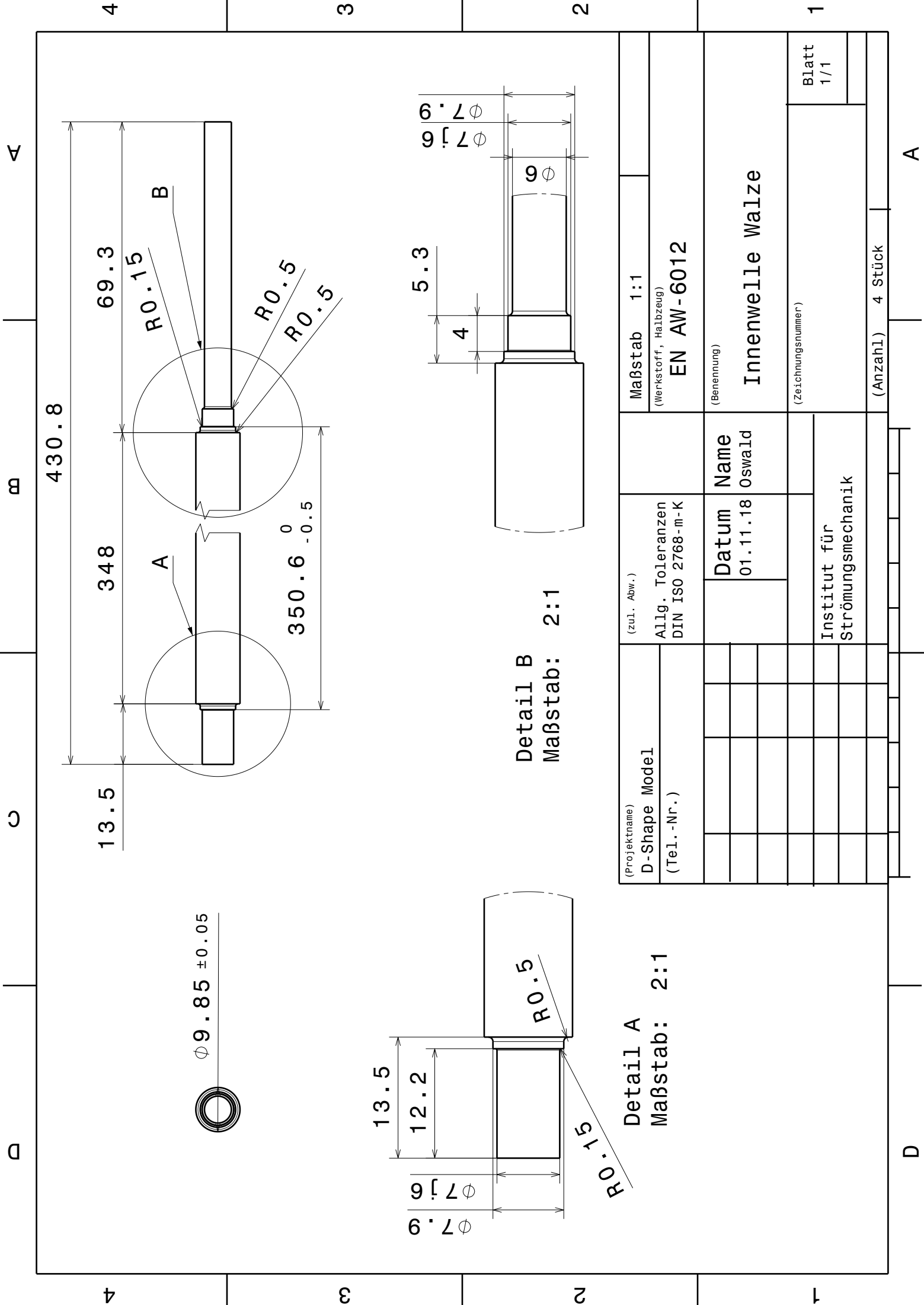
2.1	elliptische Zylinder unterschiedlicher Dickenverhältnisse im Rauchkanal [4] oben $\sigma = 0,13$ Mitte $\sigma = 0,26$ unten $\sigma = 0,5$ . . . . .	3
2.2	Stromlinienbild eines schlanken Körpers im Rauchkanal [4] . . . . .	4
2.3	Stromlinienbild eines stumpfen Körpers im Rauchkanal [4] . . . . .	4
2.4	Nachlauf eines a) schlanken Körpers und eines b) stumpfen Körpers [4] . . . . .	5
2.5	Skizze zum Coandă-Effekt [7] . . . . .	5
2.6	Stumpfkörper mit Ausblasung von Bearman [4] . . . . .	6
2.7	Stumpfkörper mit Ausblasung von Geropp [2] . . . . .	6
2.8	Ausblasung von [1] . . . . .	6
2.9	Erstes Truckmodell von Modi [6] . . . . .	7
2.10	Zweites Truckmodell von Modi [6] . . . . .	7
2.11	betrachtete Modelle für Auslegung der Regelung [3] . . . . .	8
3.1	schematische Darstellung des Versuchsmodells . . . . .	9
3.2	mathematische Funktionen für Zahnform . . . . .	10
3.3	Querschnitt durch die finalen Walzen . . . . .	11
3.4	Signalverlauf der Walzen . . . . .	12
3.5	Periodische Signale der Walzen . . . . .	12
3.6	MATLAB Skript zur Berechnung der Zahnöffnung . . . . .	14

# Tabellenverzeichnis

1.1	Initialien der beteiligten Personen . . . . .	1
2.1	Widerstandsreduktion bei Modi . . . . .	7
3.1	Modellwerte für Frequenzberechnung . . . . .	13
3.2	Zähnezahlen mit zugehörigen Frequenzen . . . . .	13

## Anhang A

### Technische Zeichnungen (NB, TG)



A

m

0

D

4

3

2

1

4

3

2

1

D

A



A

B

C

D

4

4

3

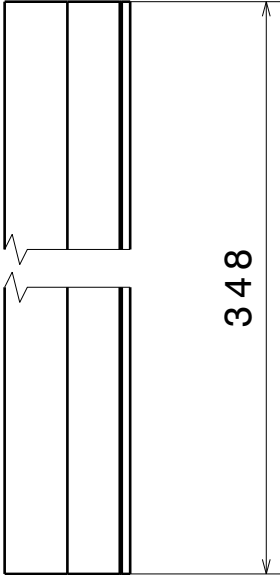
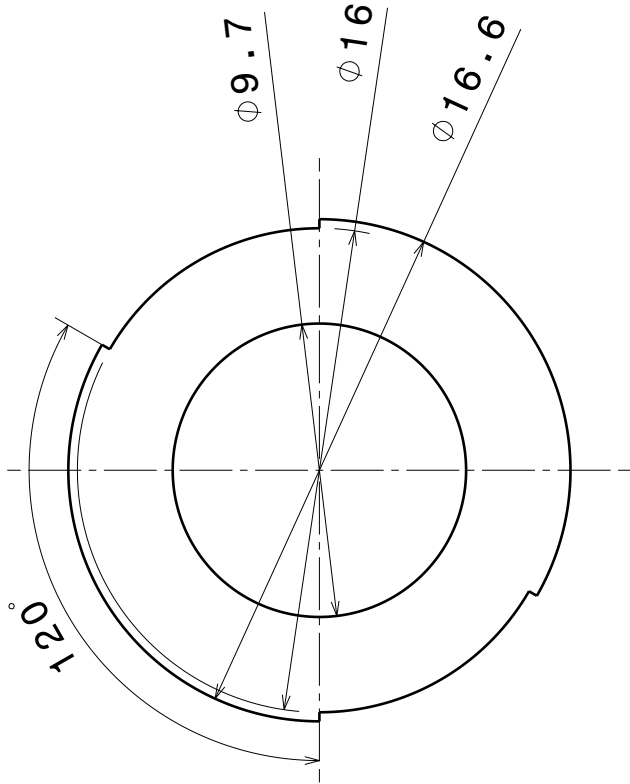
3

2

2

1

1



348

Seitenansicht rechts  
Maßstab: 4:1

(Projektname) D-Shape Model (Tel.-Nr.)		(zul. Abw.) Allg. Toleranzen DIN ISO 2768-m-K		Maßstab 1:1  (Werkstoff, Halbzeug) PTFE	
		Datum 01.11.18	Name Oswald	(Benennung)  gezahnte Welle 33%	
		Institut für Strömungsmechanik		(Zeichnungsnummer)	Blatt 1/1
				(Anzahl) 2 Stück	

D

A



## Anhang B

# Messreihe

Text.